

Algoritmi avanzati per la ricostruzione di vertici 4D con il MIP Timing Detector di CMS al HL-LHC

Raffaele Delli Gatti (Università e INFN di Trieste)
Collaborazione CMS

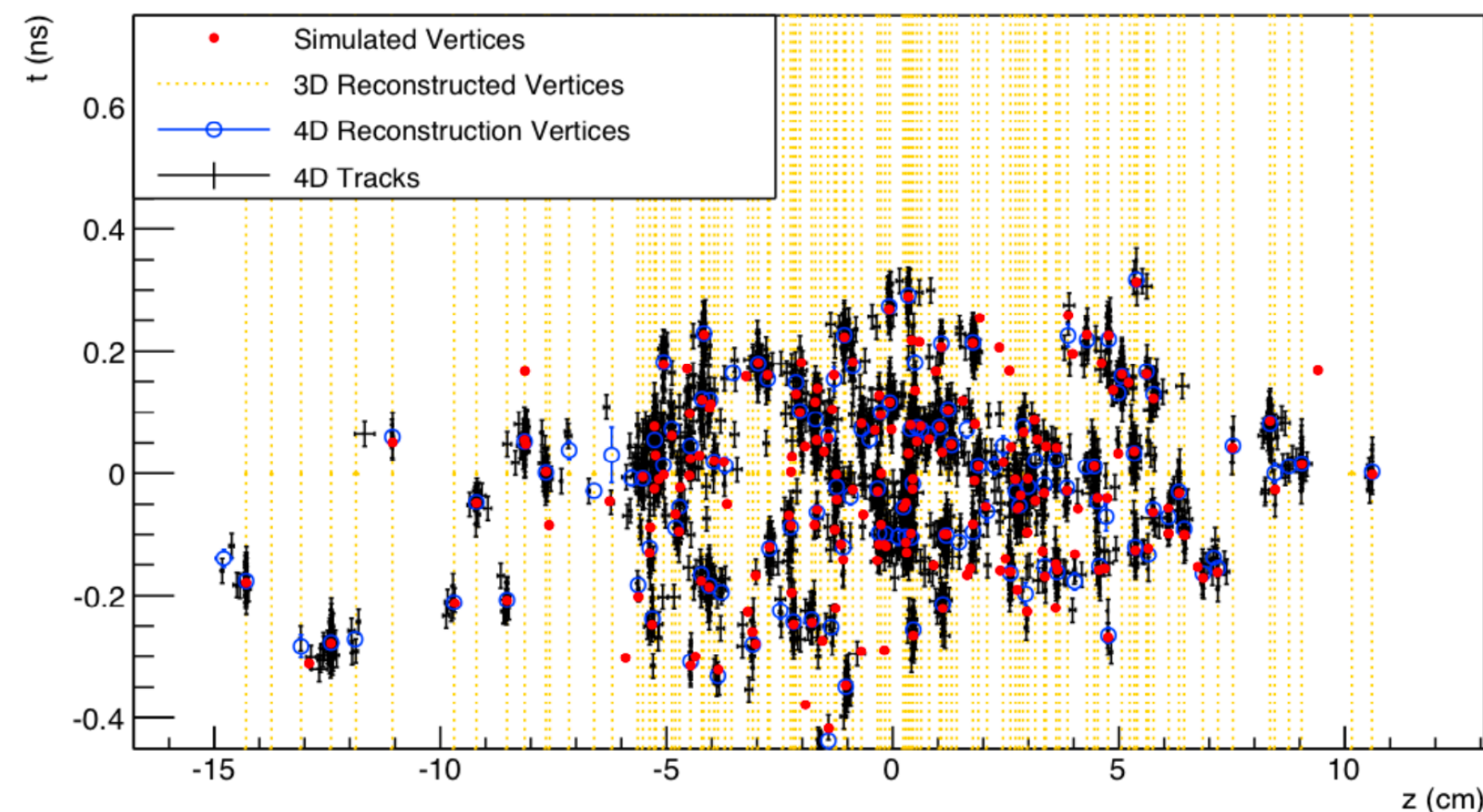
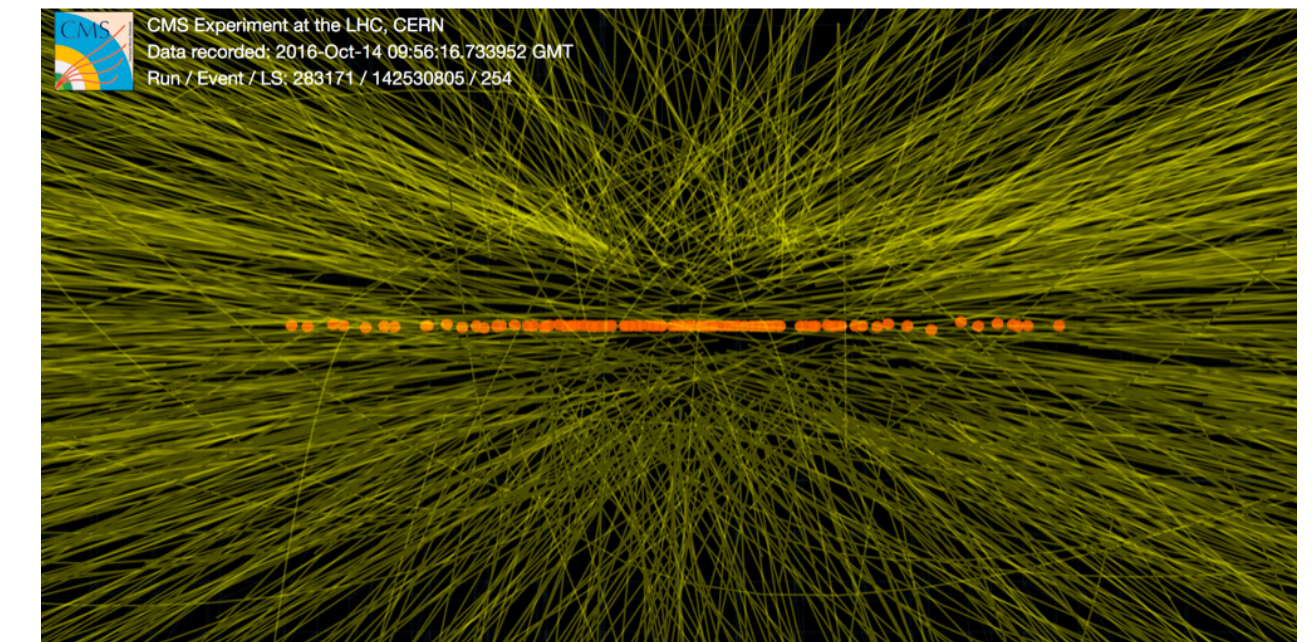
10 aprile 2024 - IFAE Cagliari



HL-LHC

	Lumi. Inst. ($cm^{-2}s^{-1}$)	$\langle PU \rangle$
LHC (2024)	$\sim 1.7 \cdot 10^{34}$	~ 60
HL-LHC	$5 - 7.5 \cdot 10^{34}$	140 – 200

- Con HL-LHC, incremento di collisioni di pileup per *bunch crossing* accanto alle interazioni di interesse
- Densità lineare vertici $\underbrace{0.3}_{\text{LHC}} \rightarrow \underbrace{1.2 - 1.9}_{\text{HL-LHC}} \text{ mm}^{-1}$



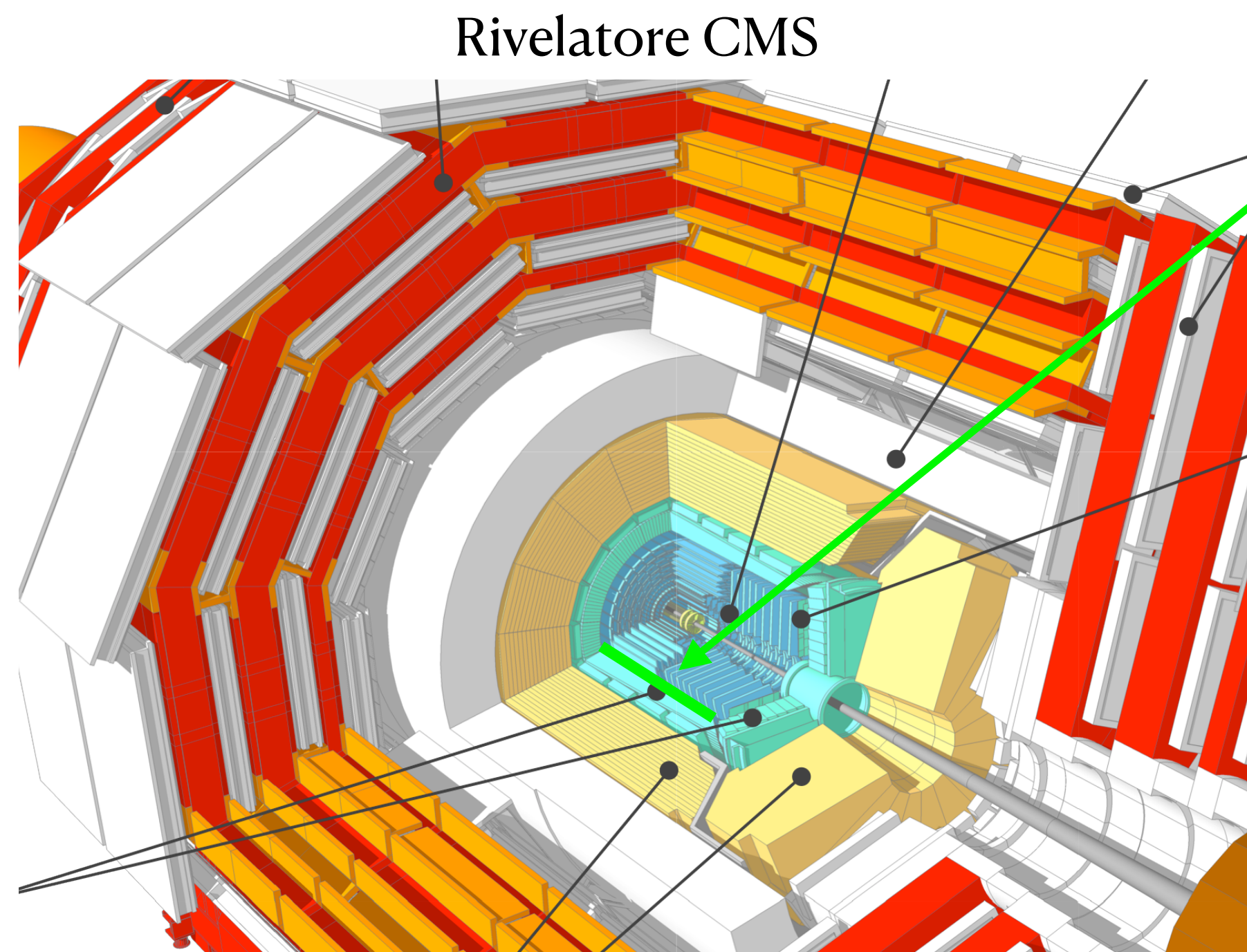
[CMS-TDR-020](#)

- L'aggiunta della misura del tempo permetterà di associare le tracce al proprio vertice con maggiore accuratezza, riducendo gli effetti del PU
- Ricostruzione **4D** del **vertice**

MIP Timing Detector

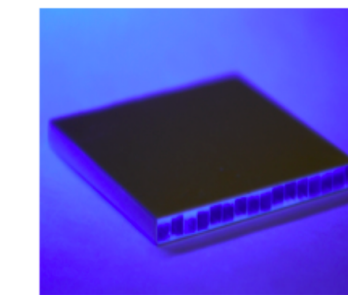
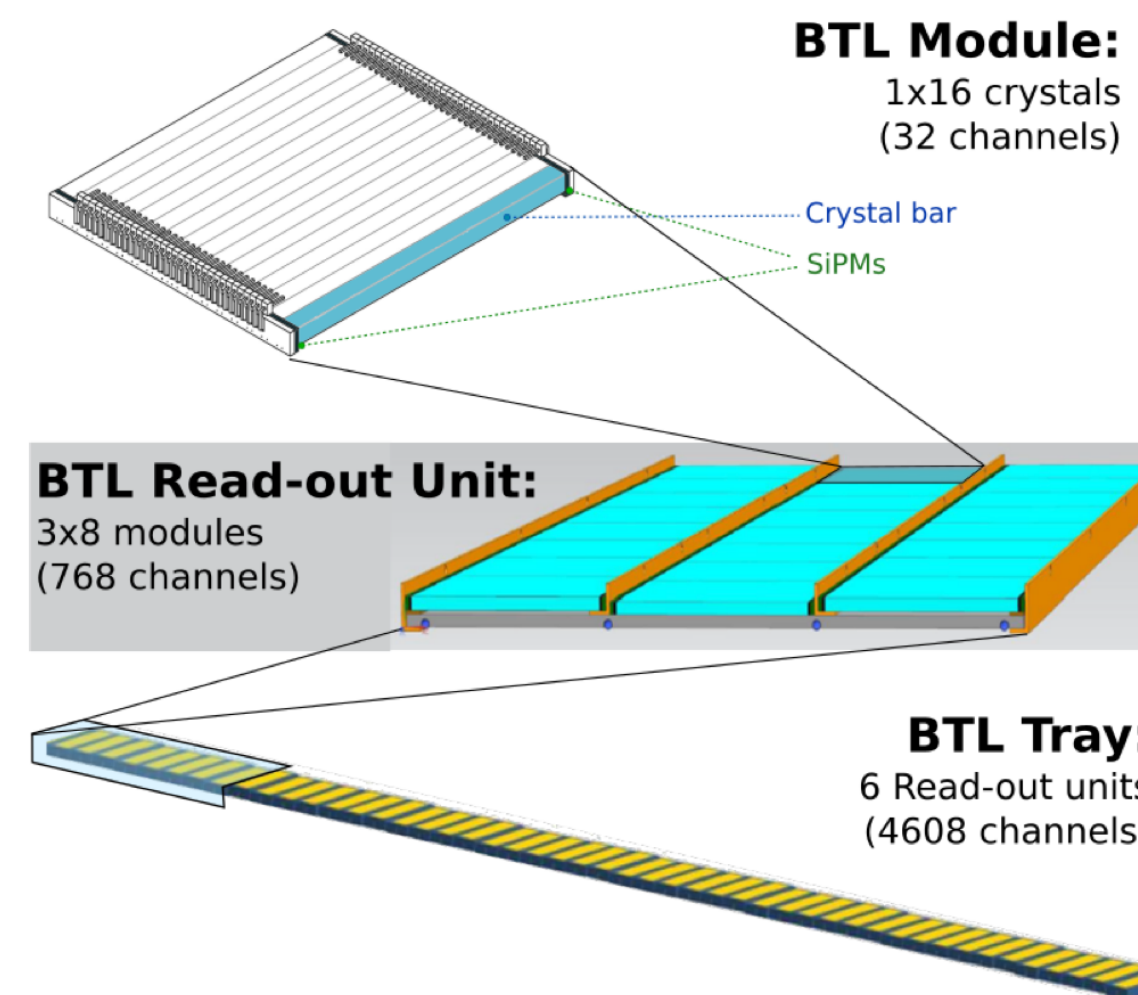
Rivelatore

- Nuovo sotto-rivelatore di CMS per la Fase II di LHC, situato tra tracciatore e calorimetro, per misurare il tempo delle particelle cariche
- Informazioni temporali con risoluzione di 30 – 40 ps a inizio HL-LHC, degradata a causa dei danni da radiazione a fine presa dati
- Diviso in una parte barrel (**BTL**) e due endcap (**ETL**)

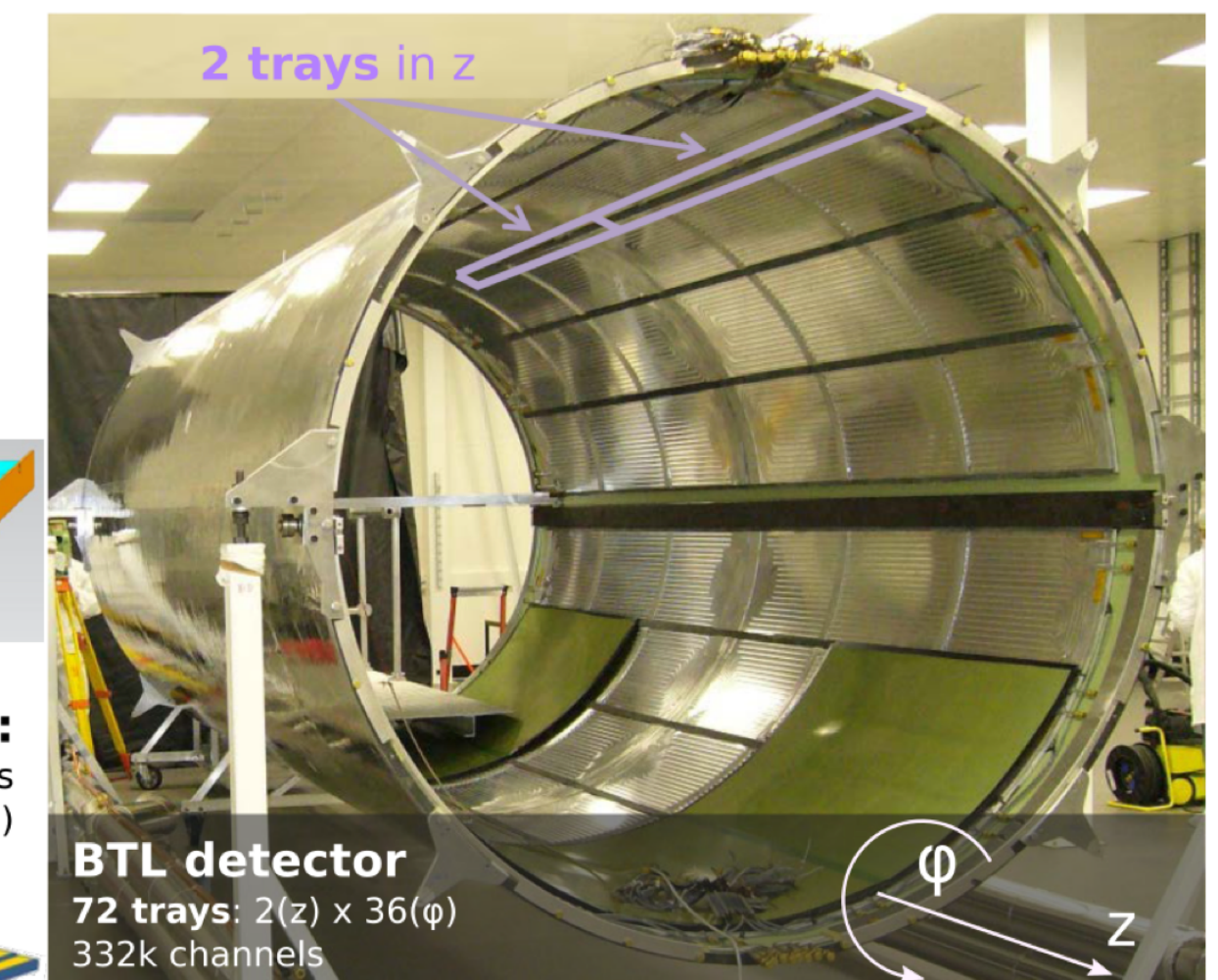


Barrel Timing Layer (BTL)

$$|\eta| < 1.45$$



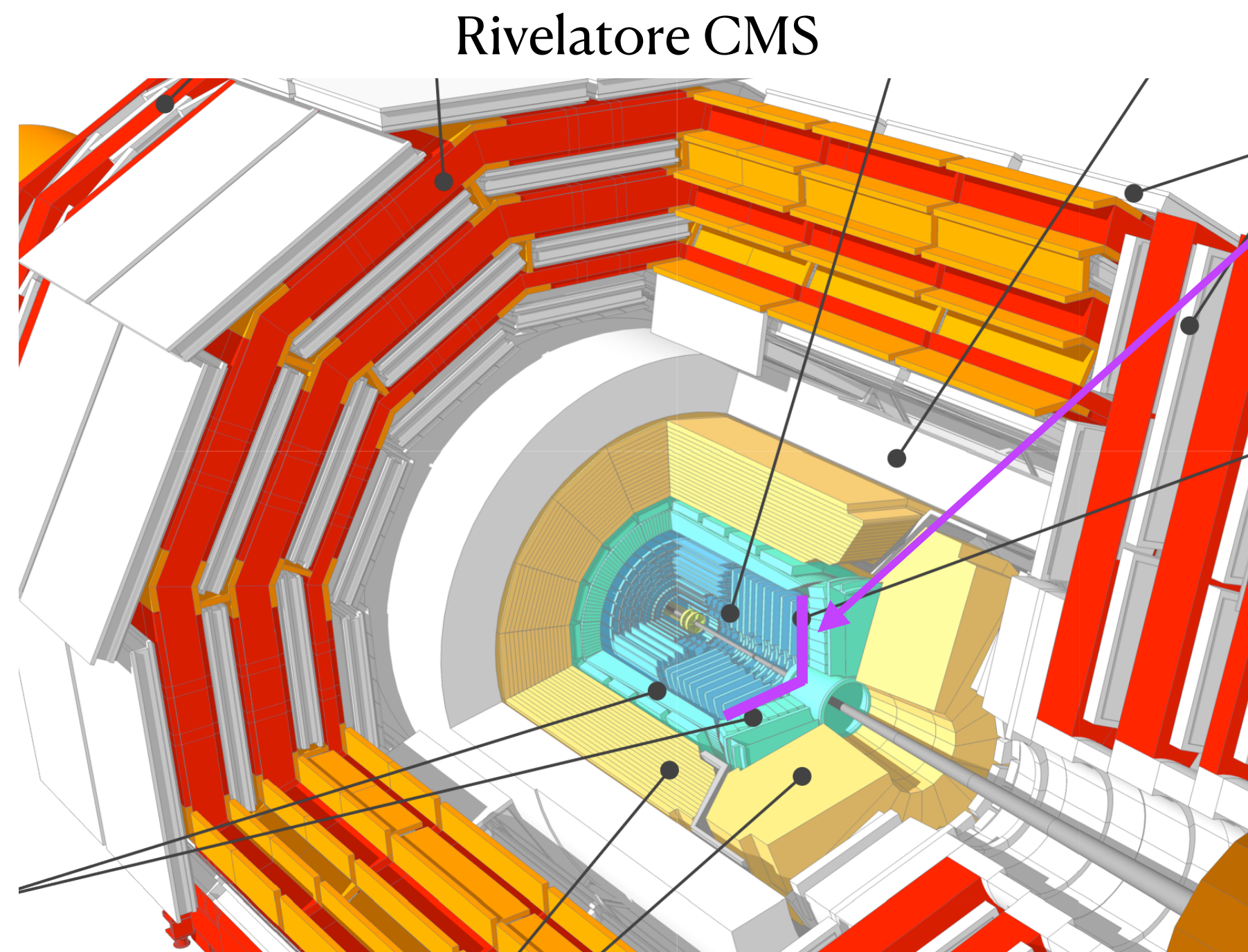
- LYSO:Ce bars
- SiPM readout



MIP Timing Detector

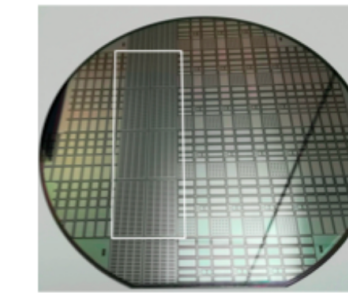
Rivelatore

- Nuovo sotto-rivelatore di CMS per la Fase II di LHC, situato tra tracciatore e calorimetro, per misurare il tempo delle particelle cariche
- Informazioni temporali con risoluzione di 30 – 40 ps a inizio HL-LHC, degradata a causa dei danni da radiazione a fine presa dati
- Diviso in una parte barrel (**BTL**) e due endcap (**ETL**)

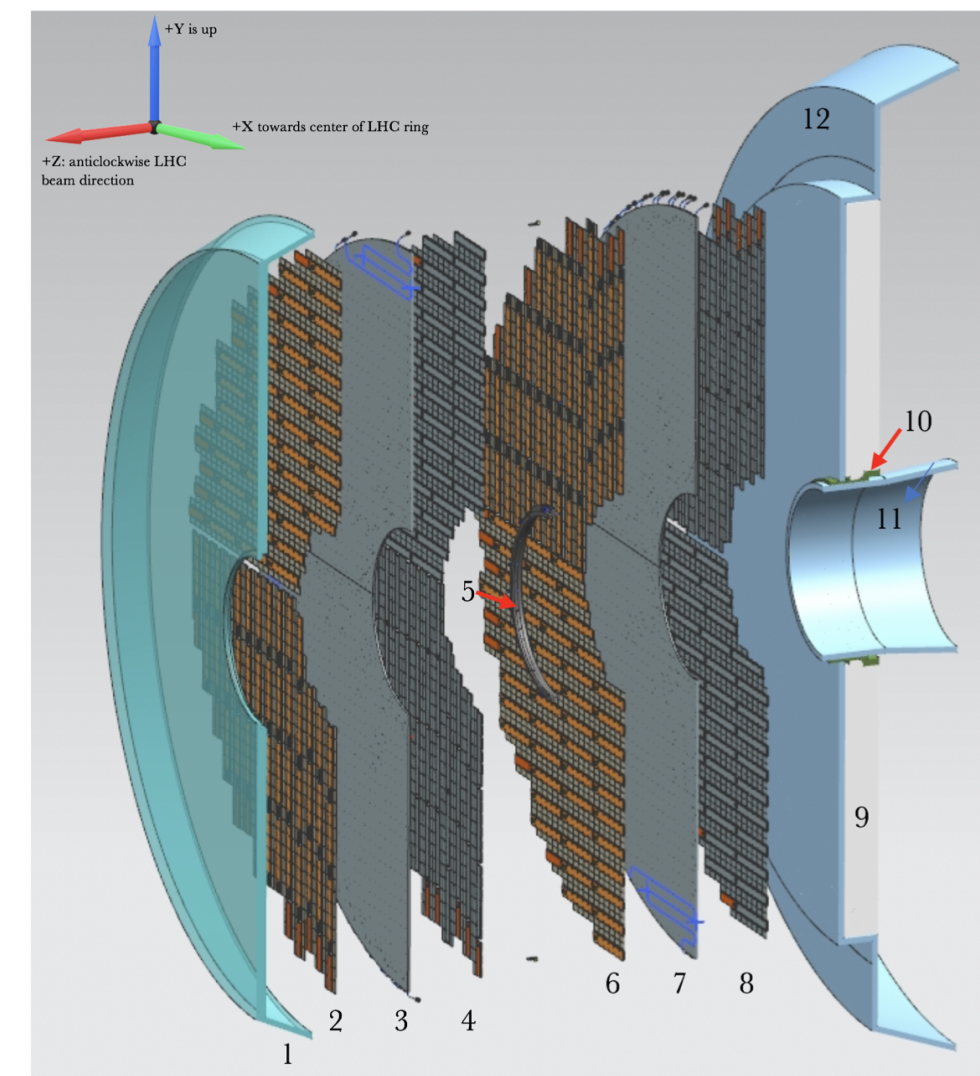


Endcap Timing Layer (ETL)

$$1.6 < |\eta| < 3$$



- LGAD



- 1: ETL Thermal Screen
- 2: Disk 1, Face 1
- 3: Disk 1 Support Plate
- 4: Disk 1, Face 2
- 5: ETL Mounting Bracket
- 6: Disk 2, Face 1
- 7: Disk 2 Support Plate
- 8: Disk 2, Face 2
- 9: HGCal Neutron Moderator
- 10: ETL Support Cone
- 11: Support cone insulation
- 12: HGCal Thermal Screen

Ricostruzione dei vertici

Ricostruzione 3D

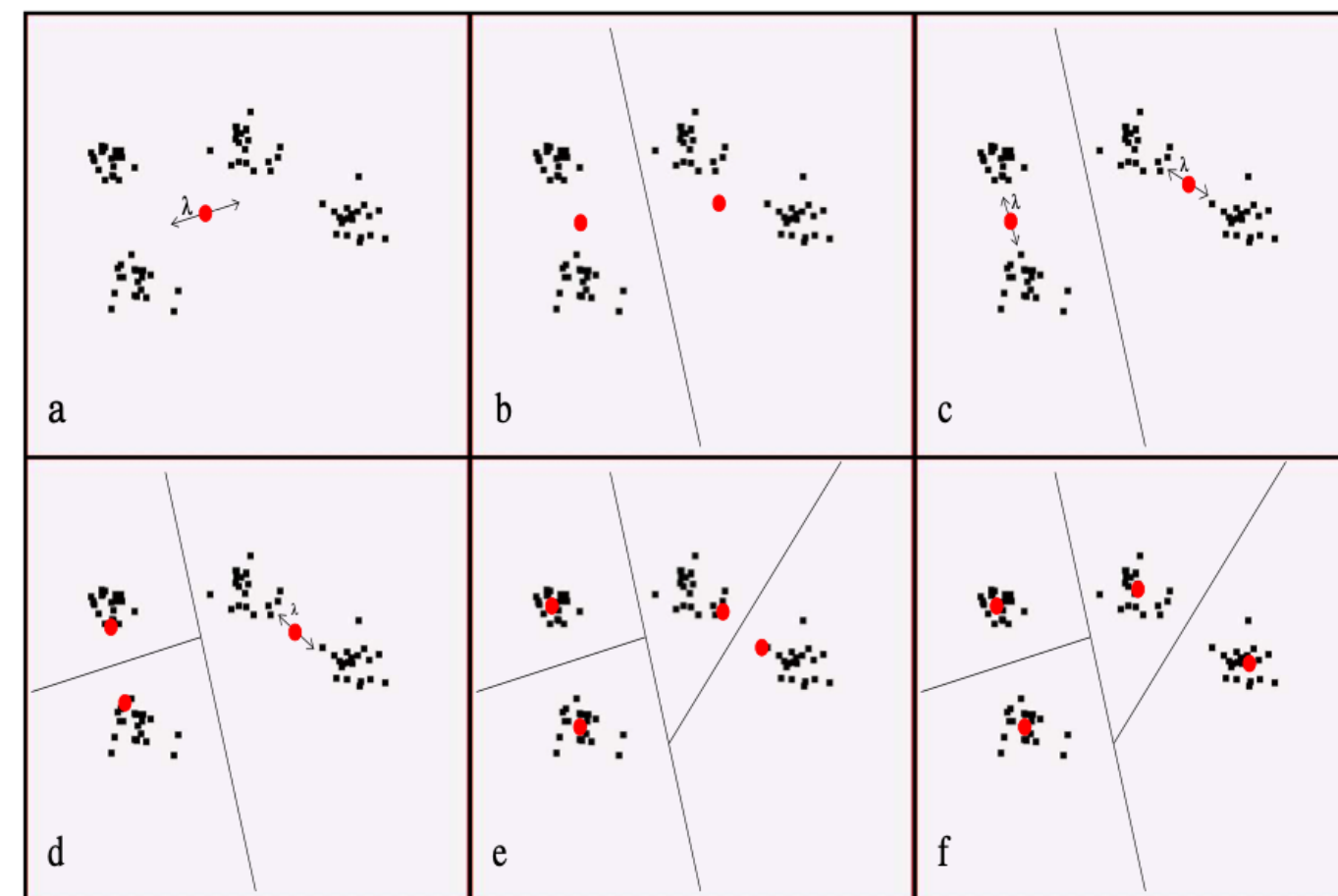
Clusterizzazione 3D ➔ Fit vertice 3D

- Vertici 3D ricostruiti clusterizzando le tracce con un algoritmo di **Deterministic Annealing** (DA) e fittando a un vertice comune
- Tracce assegnate a diversi vertici con una certa probabilità

- **Posizione del vertice** z_k^V dalla minimizzazione di
[2014 JINST 9 P10009](#)

$$F = -T \sum_{\text{tracks}, i} p_i \log \sum_{\text{vertices}, k} \rho_k e^{-\frac{1}{T} \frac{(z_i^T - z_k^V)^2}{\sigma_i^2}}$$

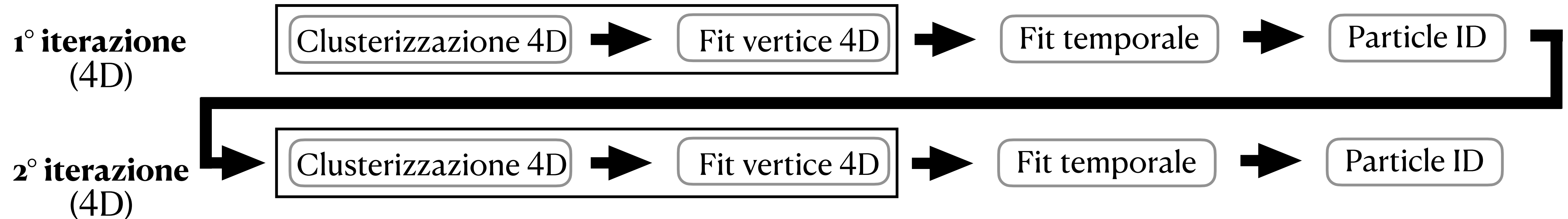
(Temperatura) $\rightarrow T$
 (Pesi) $\rightarrow p_i$
 (Coordinata z traccia) $\rightarrow z_i^T$
 (Incertezza su z_i^T) $\rightarrow \sigma_i^2$



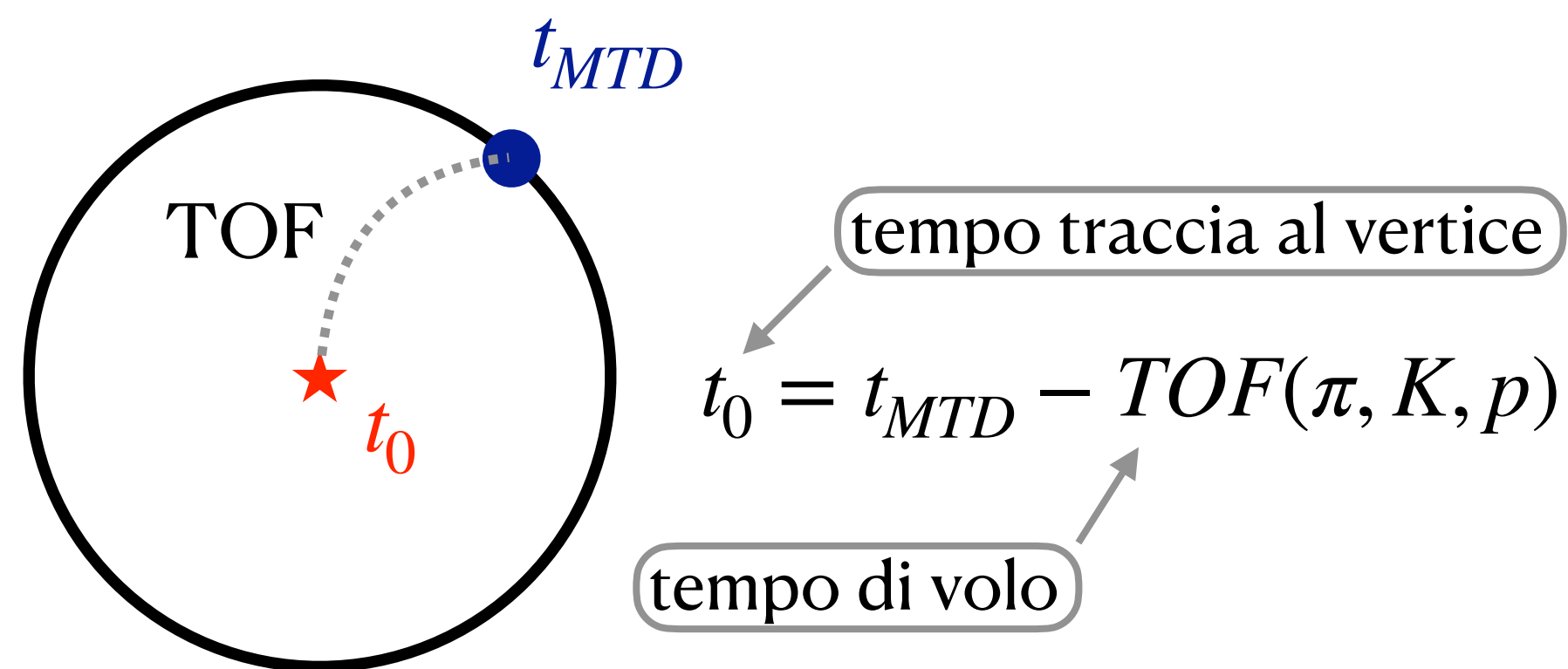
Evoluzione DA al variare di T
[CHEP 2004, 287-290](#)

Ricostruzione dei vertici

Ricostruzione **4D legacy**



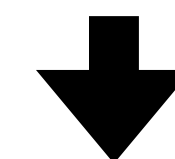
- Vertice 4D ricostruito clusterizzando le tracce usando **estensione del DA** nella coordinata spaziale z lungo la beam line e nel tempo t estrapolato indietro al punto di massimo avvicinamento (PCA) al centro del *beamspot*
- Ricostruzione del vertice 4D e Particle Identification (ID) vanno di pari passo



1° iterazione

- No info su tipo di particella prima della ricostruzione
- **Ipotesi di pione**, incertezza inflazionata

$$\sigma_0^2 = \sigma_{MTD}^2 + \sigma_{TOF}^2 + \Delta^2(TOF_p - TOF_\pi)$$



2° iterazione

- Tempi aggiornati secondo **ipotesi di massa**
- Incertezza inflazionata rimossa

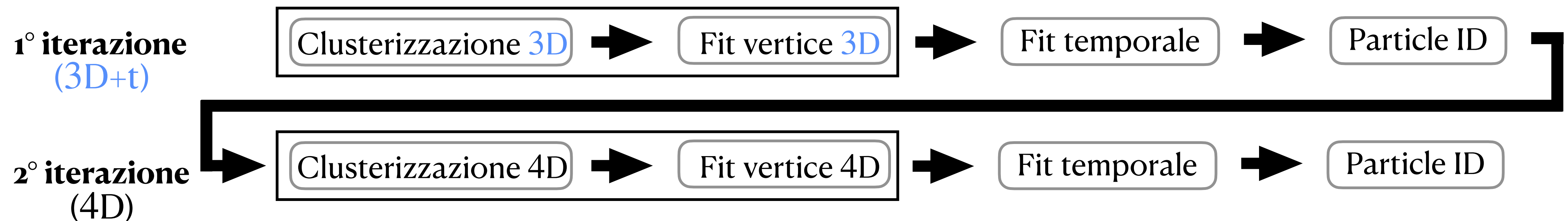
$$\sigma_0^2 = \sigma_{MTD}^2 + \sigma_{TOF}^2$$

Aggiornamento algoritmo 4D

Ricostruzione **4D legacy**

- Ricostruzione **4D legacy** non ben ottimizzata:
 - elevato consumo di CPU, nella 1° iterazione l'incertezza inflazionata domina su quella di MTD a bassi momenti e rende limitati i benefici dell'uso del tempo
 - Efficienza/purezza inferiori rispetto al 3D

Ricostruzione **4D aggiornata**



- L'algoritmo **4D aggiornato** [[CMS-DP/2024-085](#)] rimpiazza la 1° iterazione del **4D legacy** con vertici **3D**:
 - reso possibile dalla ricostruzione a posteriori del tempo del vertice (**3D+t**)
 - CPU-time per ricostruzione del vertice ridotta del 30 % senza perdita di performance

Aggiornamento algoritmo 4D

Ricostruzione **4D legacy**

- Il **tempo del vertice**, con la sua incertezza, è calcolato come **media pesata**:

$$t_v = \frac{\sum_{tracks,i} w_i t_{0,i}(\pi, K, p)}{\sum_{tracks,i} w_i} \text{ con } w_i = \frac{1}{\sigma_{t_{0,i}}^2(\pi, K, p)}$$

Ricostruzione **4D aggiornata**

- Tempo** t_v del vertice assegnato a posteriori usando l'informazione temporale delle tracce con un **DA dedicato**
- Per ciascun vertice, il migliore tempo t_v è ottenuto minimizzando:

peso traccia da fit 3D $\rightarrow$

$$F = -T \sum_{tracks,i} w_{0,i} \log(Z_0 + \alpha_\pi e^{-\frac{(t_{0,i}(\pi) - t_v)^2}{2T\sigma_{t_{0,i}}^2(\pi)}} + \alpha_K e^{-\frac{(t_{0,i}(K) - t_v)^2}{2T\sigma_{t_{0,i}}^2(K)}} + \alpha_p e^{-\frac{(t_{0,i}(p) - t_v)^2}{2T\sigma_{t_{0,i}}^2(p)}})$$

$t_{0,i}(\pi, K, p)$ tempo traccia PCA in differenti ip. di massa

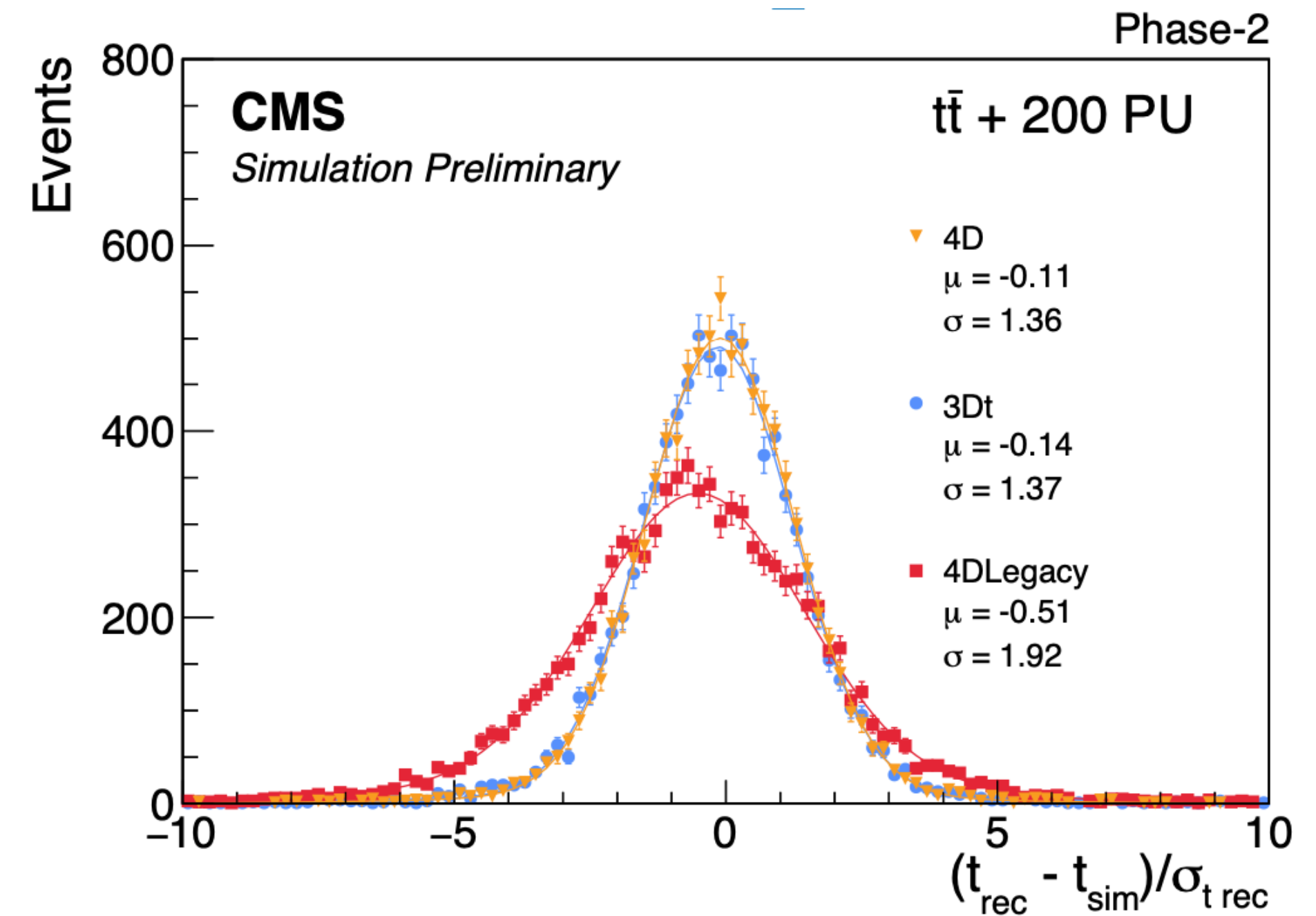
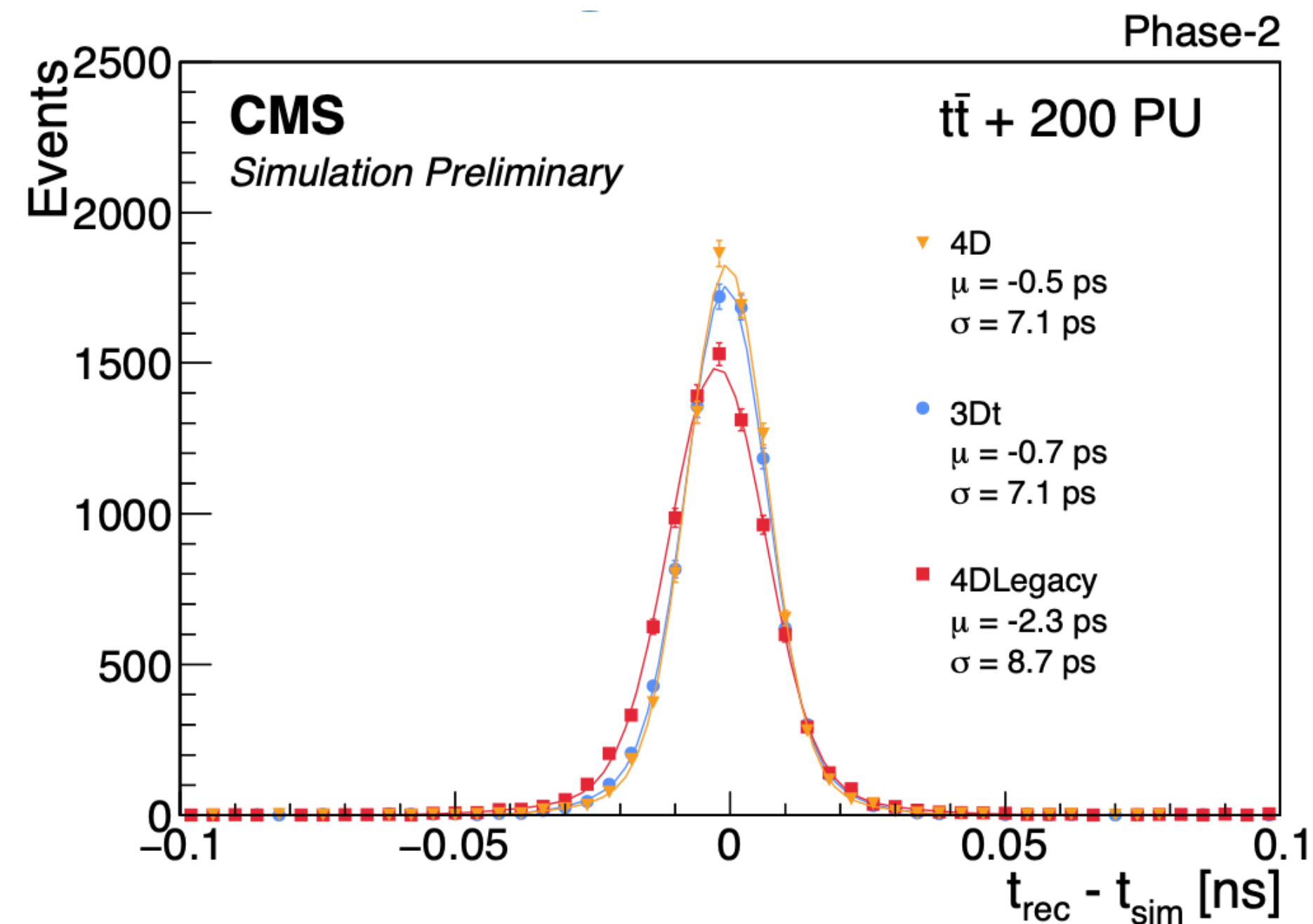
pesi a priori (0.7, 0.2, 0.1)

- L'algoritmo si può applicare a un vertice a prescindere dall'uso del tempo nella ricostruzione:
 - vertice **3D+t** con DA per calcolo del tempo
 - vertice **4D aggiornato** con DA per calcolo del tempo nella 2° iterazione

Studio delle prestazioni

Tempo del vertice di segnale

- **Risoluzione** per vertici di segnale correttamente associati ai vertici primari *leading* ricostruiti



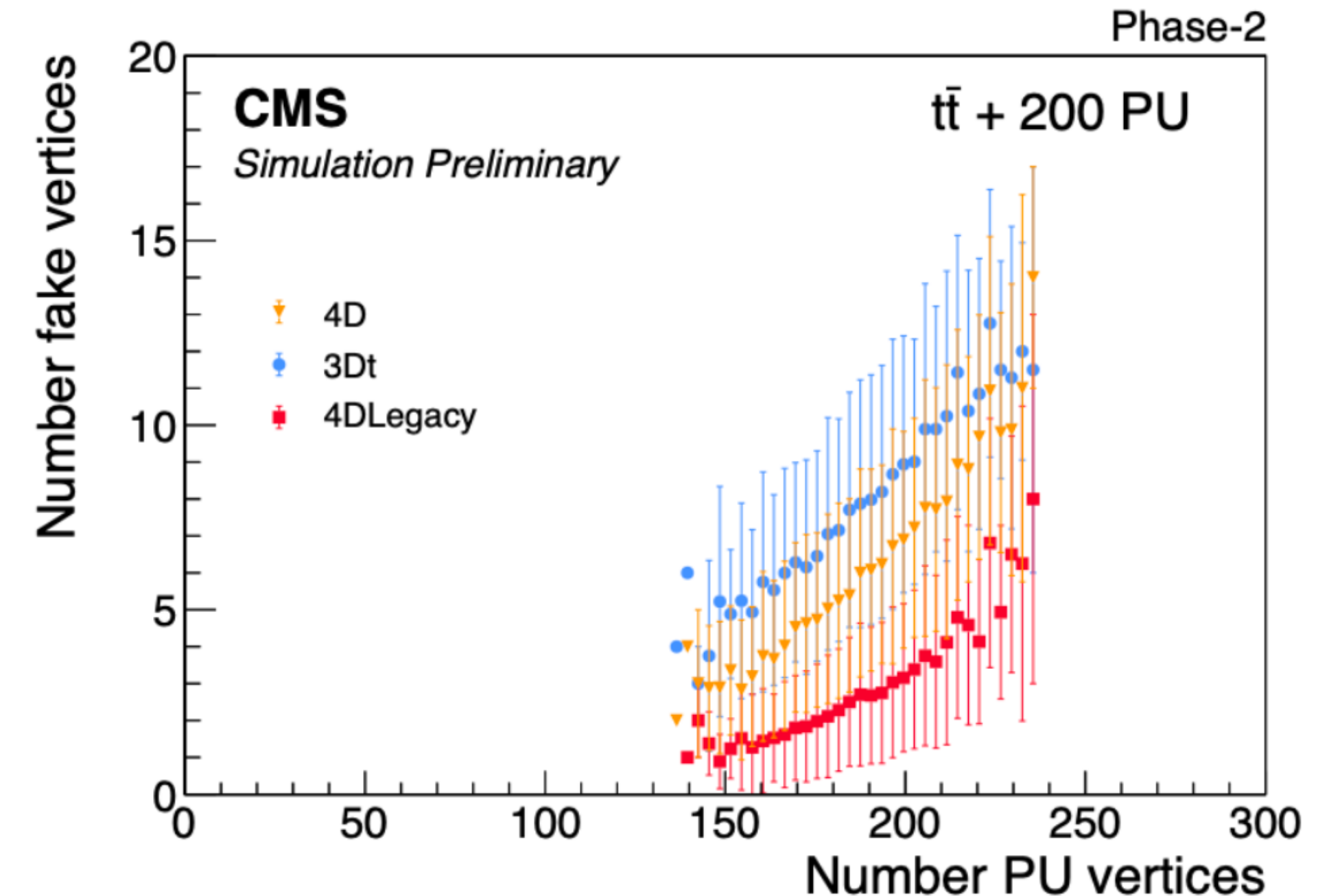
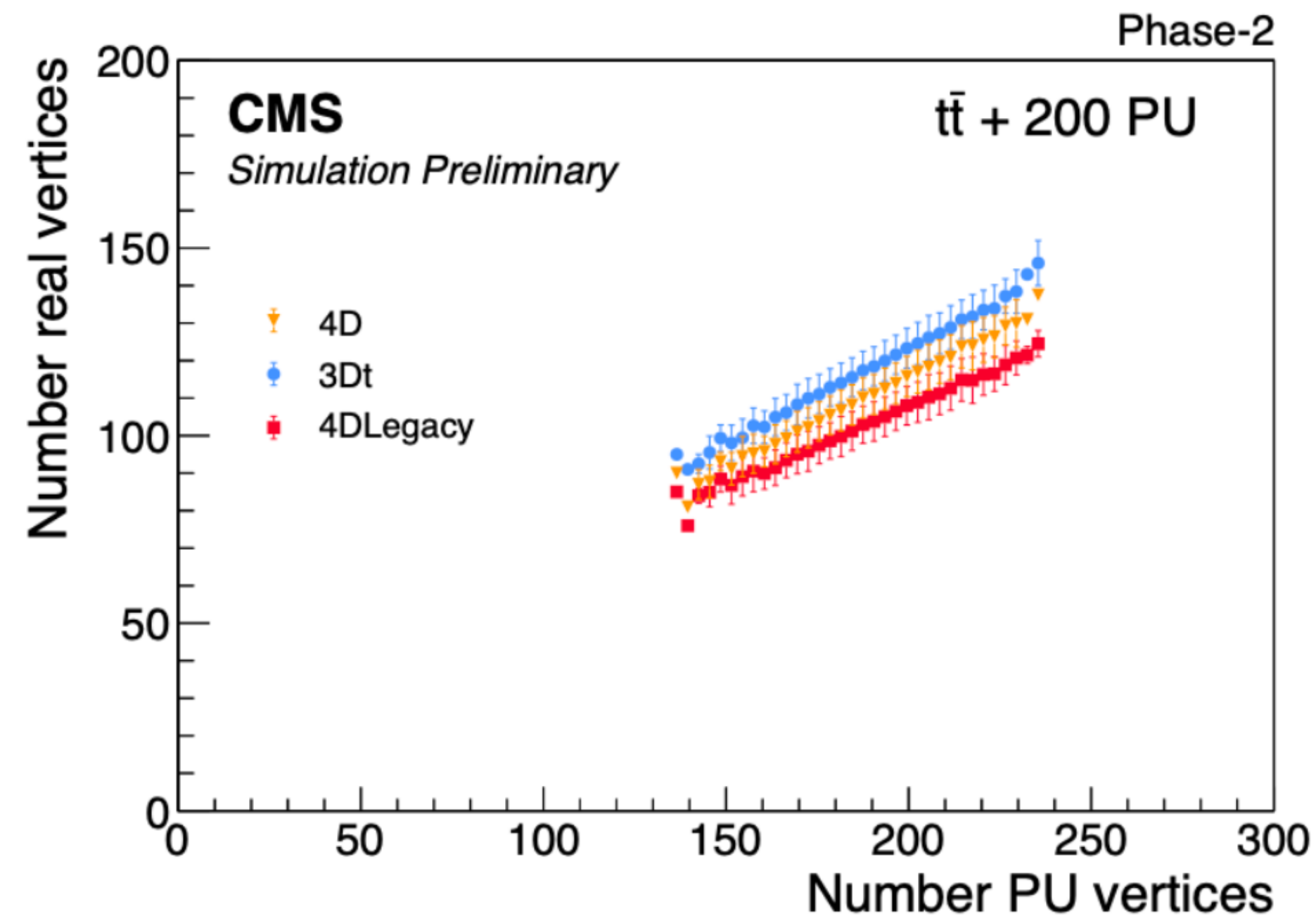
Gli algoritmi **3D+t** e **4D** mostrano un miglioramento nella risoluzione rispetto al **4D legacy**

Il bias negativo nella ricostruzione dei vertici **4D legacy** si riduce in quelli **3D+t** e **4D**

Studio delle prestazioni

Numero di vertici

- Numero di vertici ricostruiti in funzione del numero di vertici PU per vertici **reali** e **falsi**



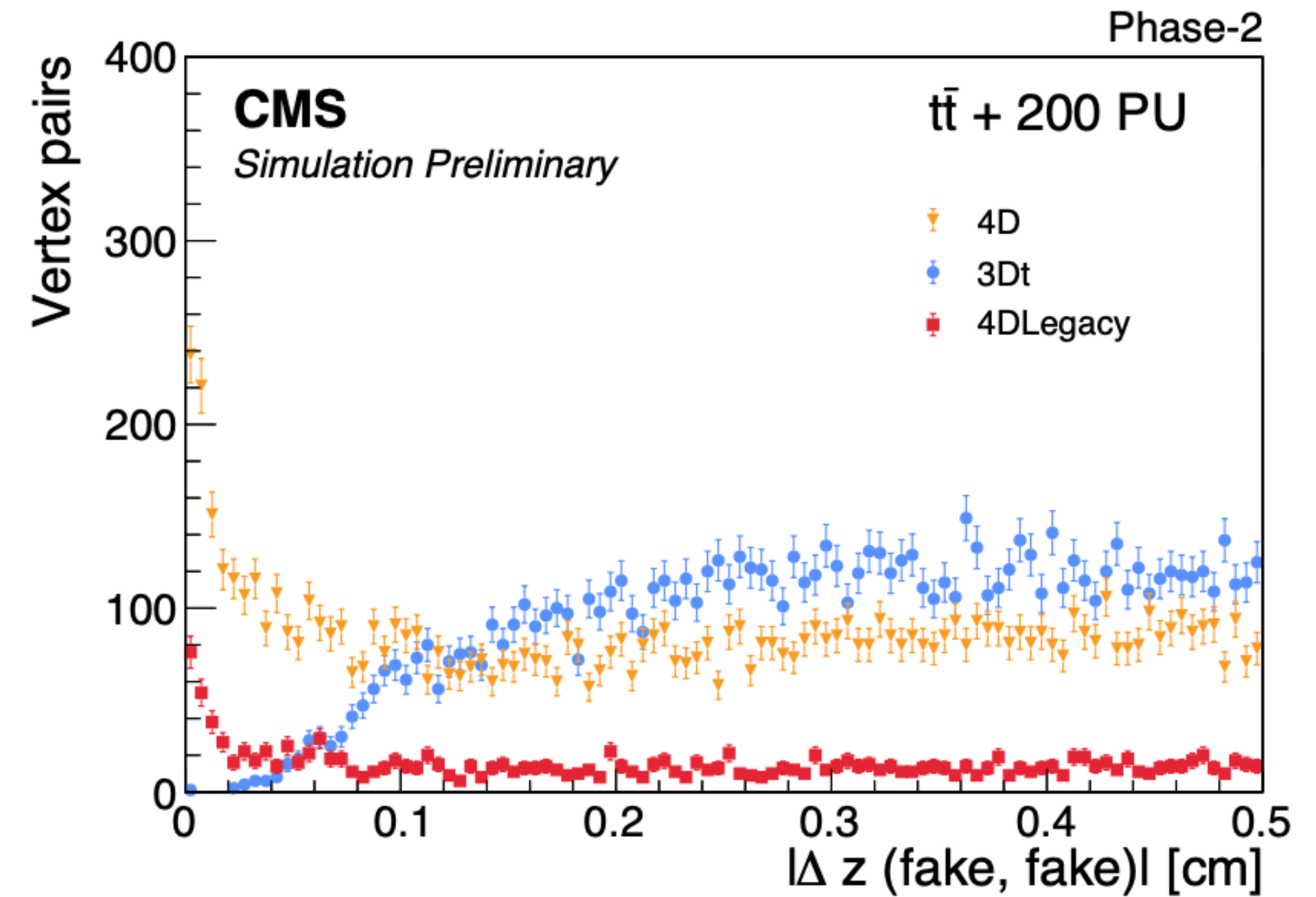
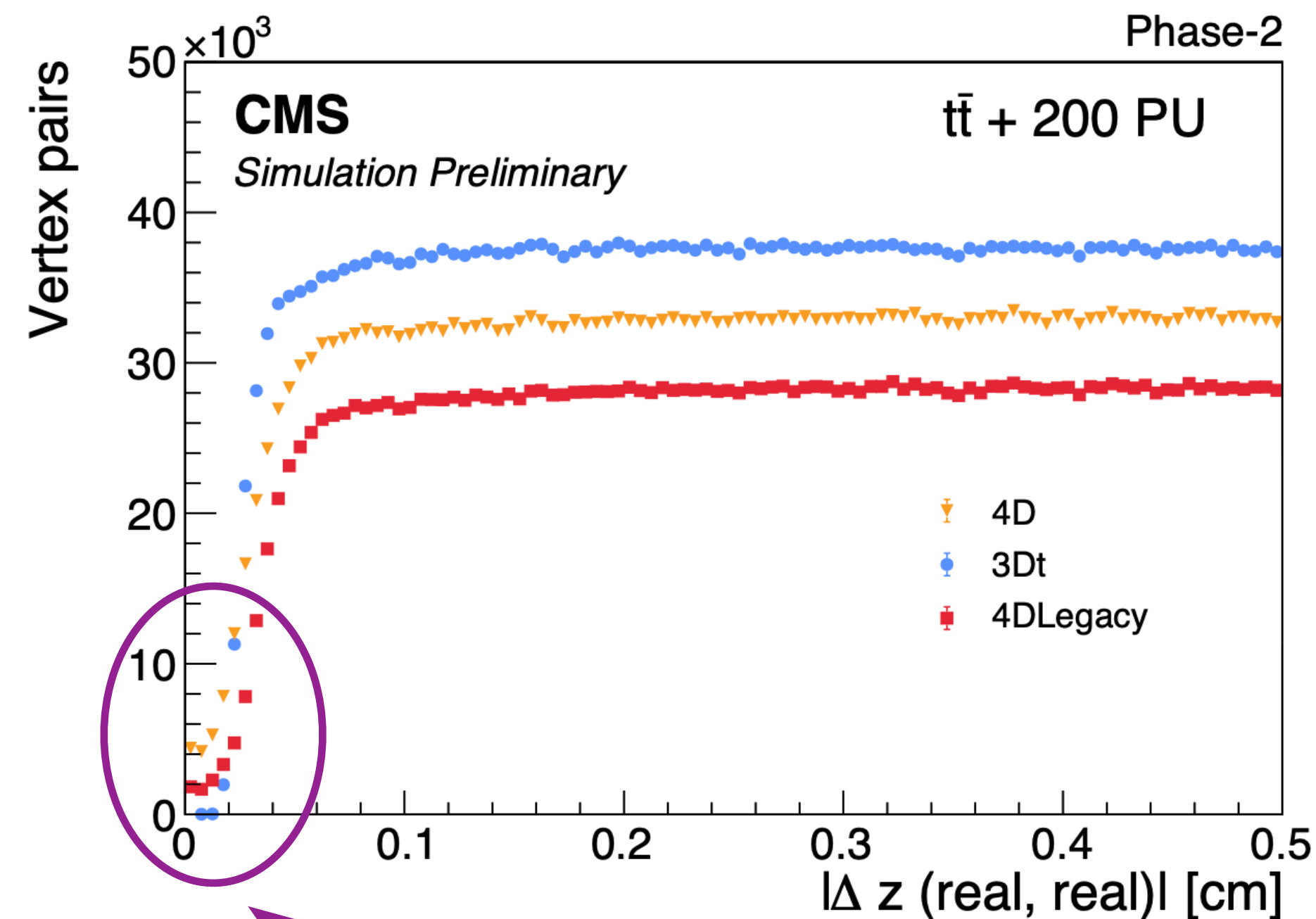
Algoritmo **3D+t** ricostruisce un maggior numero di vertici reali, ma anche di falsi

L'algoritmo **4D** mostra prestazioni intermedie tra l'algoritmo **4D legacy** e l'algoritmo **3D+t**

Studio delle prestazioni

Distanza in z

- Distanza tra coppie di vertici: l'algoritmo **4D** mostra un maggior numero di coppie di vertici reali vicine in z rispetto al **4D legacy**, ma anche un maggior numero di falsi



Miglioramento del nuovo algoritmo visibile soprattutto per coppie di vertici reali con Δz vicino a 0

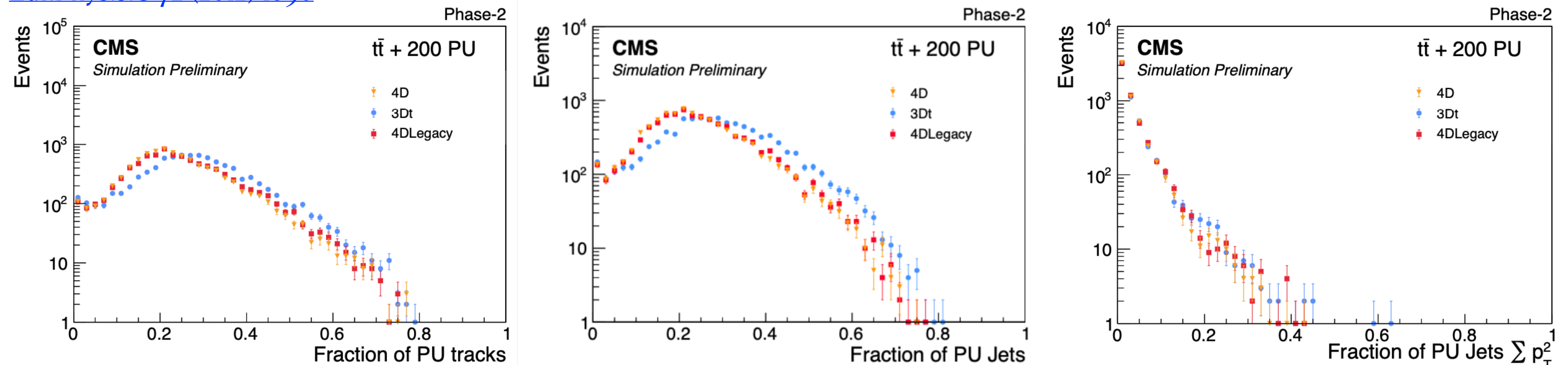
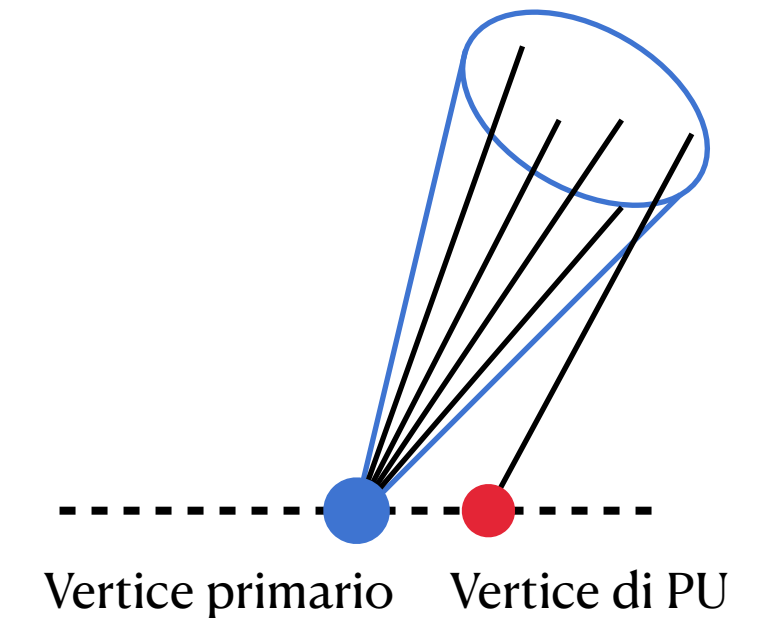
Vantaggio nell'uso del **timing**: vertici sovrapposti spazialmente possono essere separati nel tempo

Studio delle prestazioni

Contaminazione di pileup sulle osservabili fisiche

- Caratterizzazione del contributo di PU del vertice primario leading
- Impatto PU su **molteplicità di tracce** e **clusterizzazione jet** (escludendo tracce PU)
- Tracce ricostruite da stesso vertice clusterizzate con Fastjet, algoritmo anti- K_T con parametro 0.4

[Eur.Phys.J.C 72 \(2012\) 1896](#)

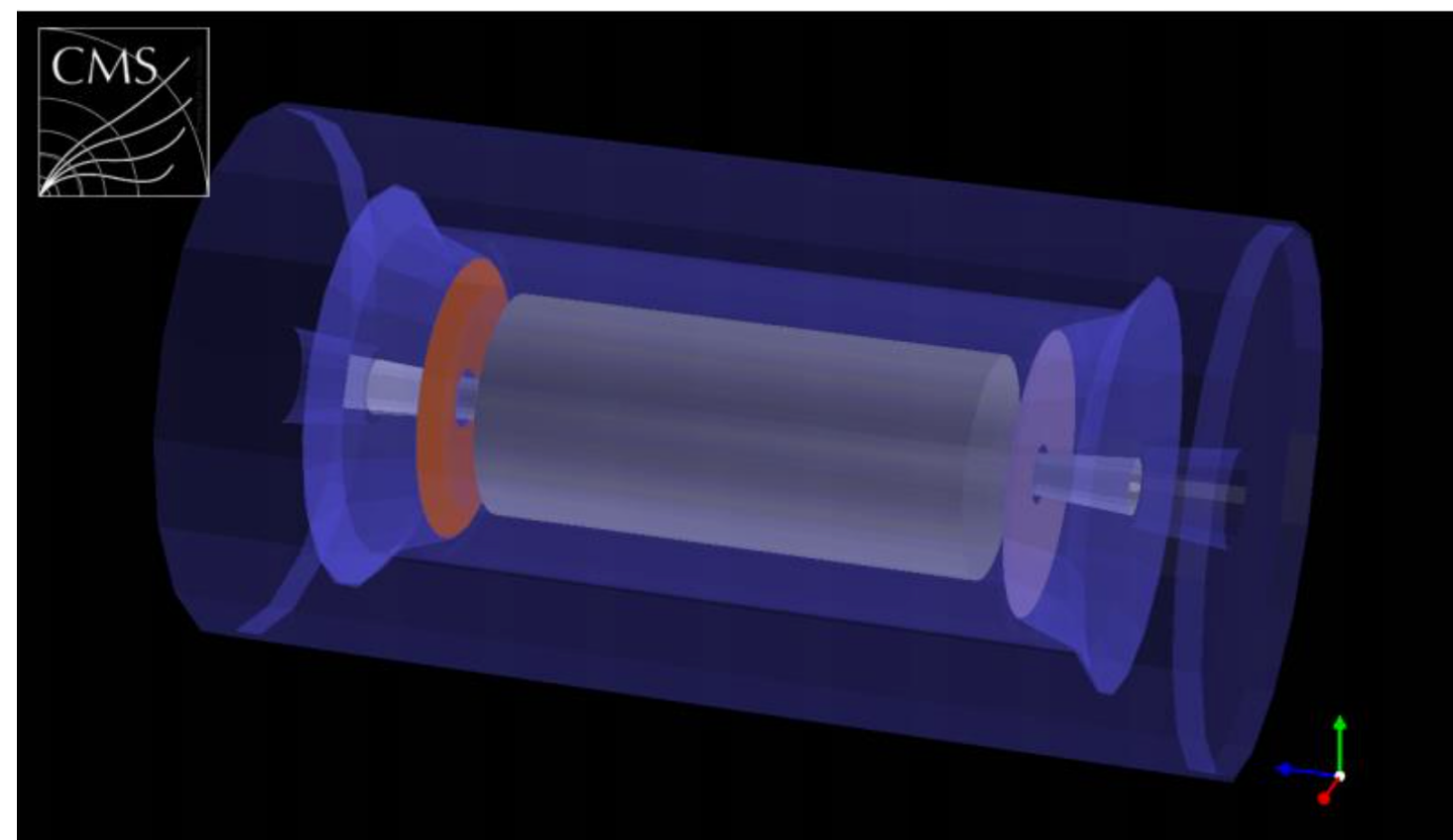


Contributo di pileup inferiore del 10 – 15 % nei vertici 4D e 4D legacy rispetto al 3D+t

Somma del p_T^2 dei jet, usata nell'ordinamento dei vertici, meno sensibile all'algoritmo di ricostruzione dei vertici

Sommario

- La ricostruzione dei vertici $4D$ è sia un problema di **clusterizzazione** che di **classificazione**
- In questa presentazione è stata mostrata l'ottimizzazione della ricostruzione dei vertici $4D$
- L'utilizzo del **Deterministic Annealing** per misure il tempo al posto della media pesata migliora la risoluzione per vertici di segnali
- L'uso dell'informazione temporale fornita da MTD migliora la **reiezione del PU** ad HL-LHC
- La ricostruzione degli eventi con MTD rappresenterà un test cruciale per le **moderne capacità di misurazione dei tempi** nei futuri esperimenti di collisione



Grazie

Raffaele Delli Gatti (Università e INFN di Trieste)
Collaborazione CMS

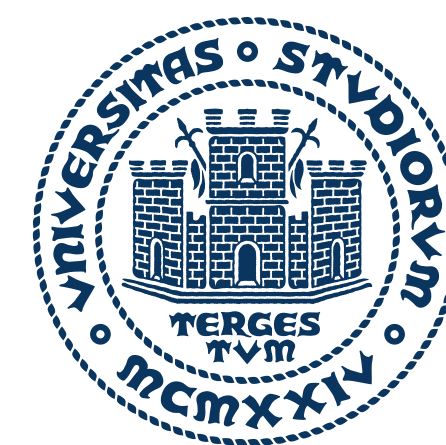
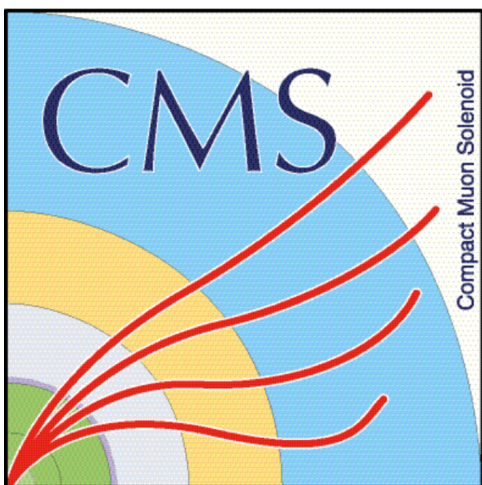
10 aprile 2024 - IFAE Cagliari



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

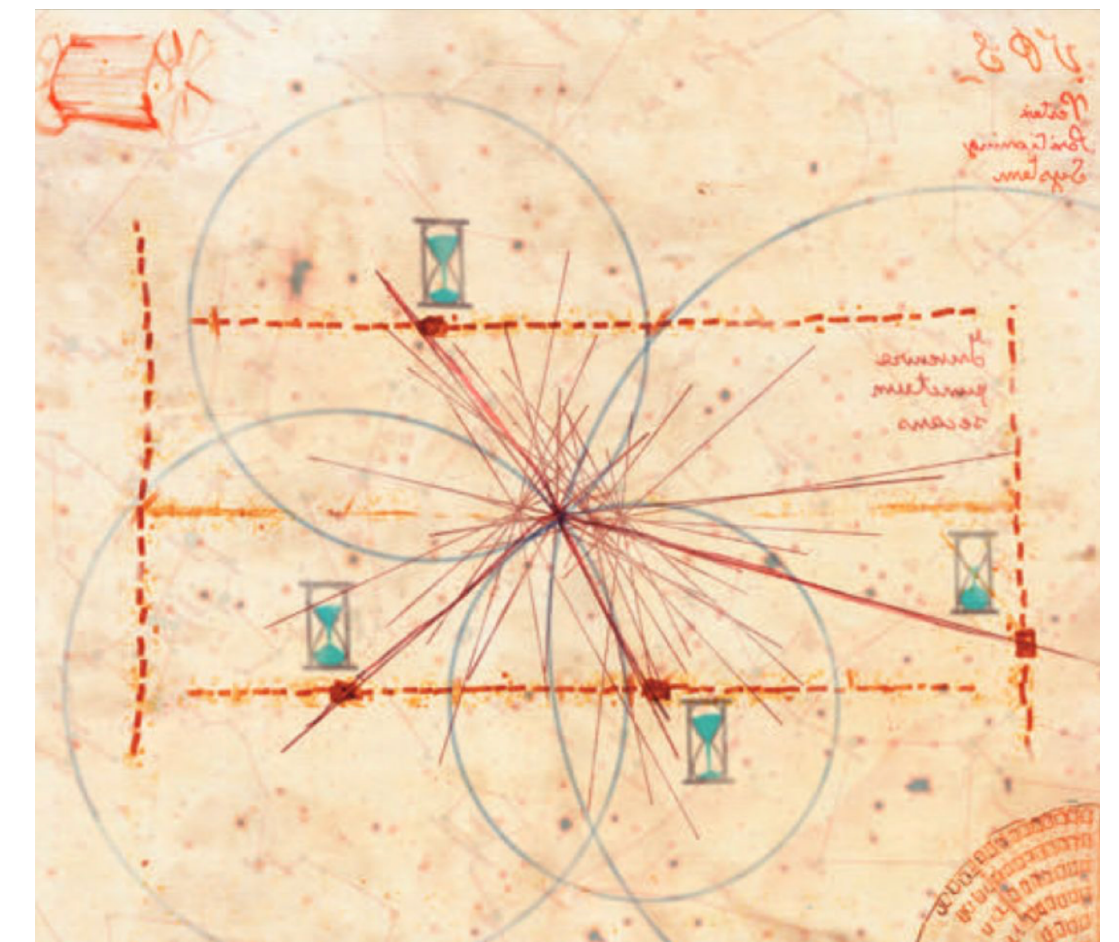


Backup



HL-LHC

- **High-Luminosity LHC**: luminosità istantanea di almeno un fattore 5 oltre il valore di progetto di LHC a partire dal 2030
 - Studi approfonditi sul Modello Standard e ricerche di nuova Fisica
 - Luminosità istantanea maggiore → incremento collisioni di **pileup**
-
- Il tasso di collisioni pone una sfida per il **rivelatore CMS**, che richiederà un **aggiornamento** significativo per funzionare efficientemente
 - Il **sotto-rivelatore MTD** sarà aggiunto per affrontare la sfida di alta luminosità



A MIP Timing Detector
For the CMS Phase-2 Upgrade

MIP Timing Detector

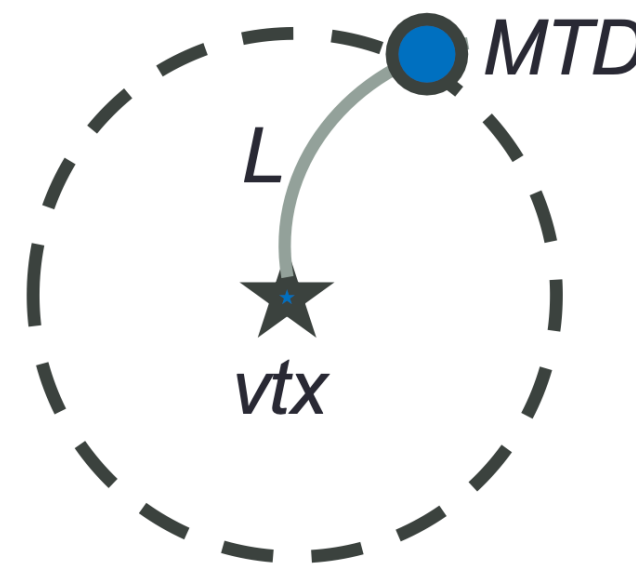
Impatti di MTD sul programma di fisica di CMS

- Ulteriori applicazioni oltre alla ricostruzione 4D del vertice e alla reiezione del PU [CMS-TDR-020](#)

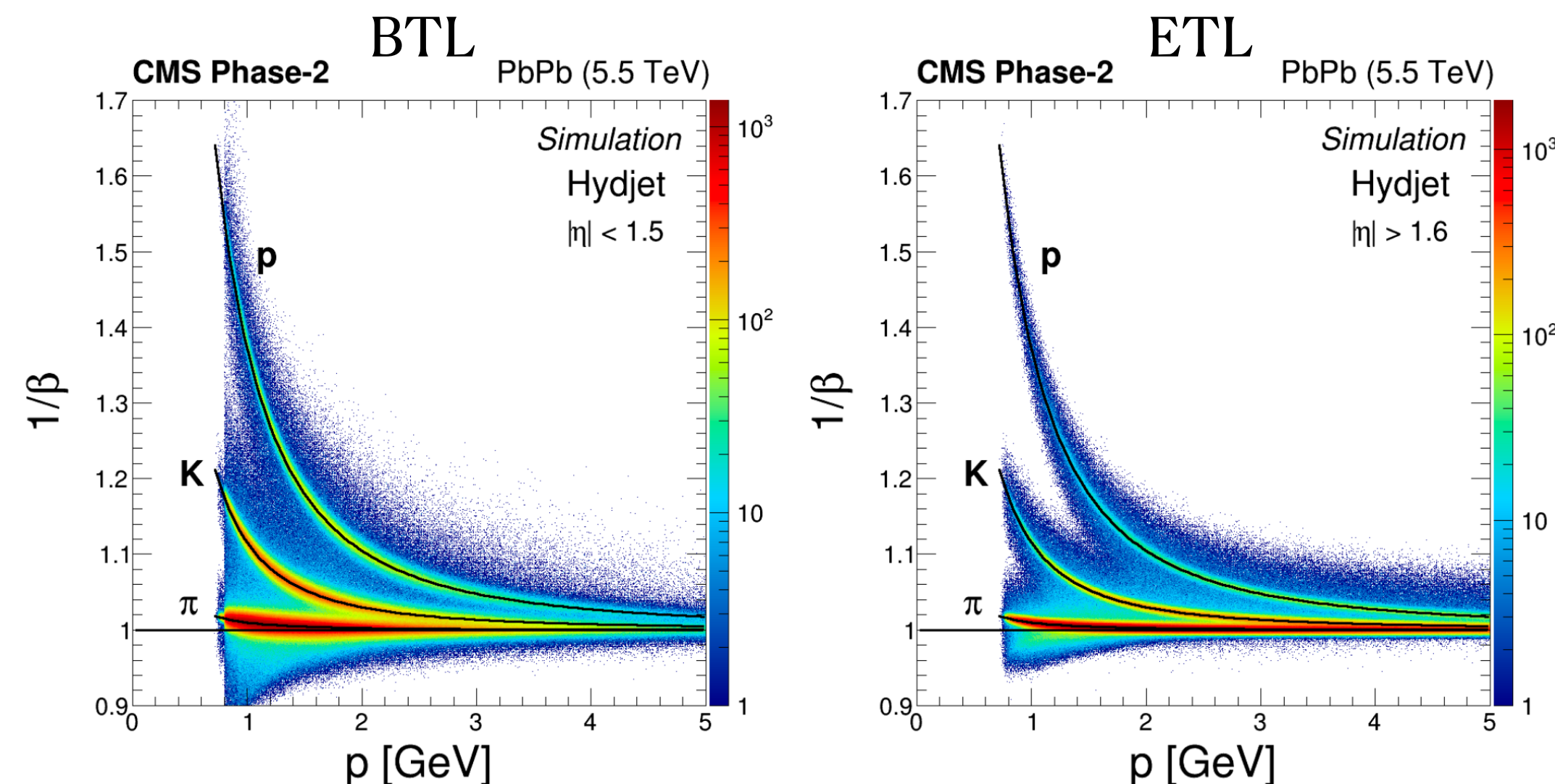
Particle Identification (PID)

- La propagazione del tempo della traccia necessita un'ipotesi di massa:

$$\frac{1}{\beta} = \frac{c(t_{MTD} - t_v)}{L}$$

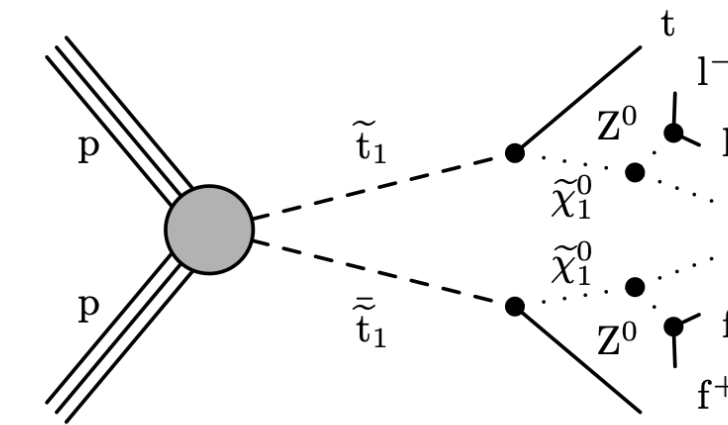


- Benefici significativi per fisica di **Ioni Pesanti** (vertici ben separati)

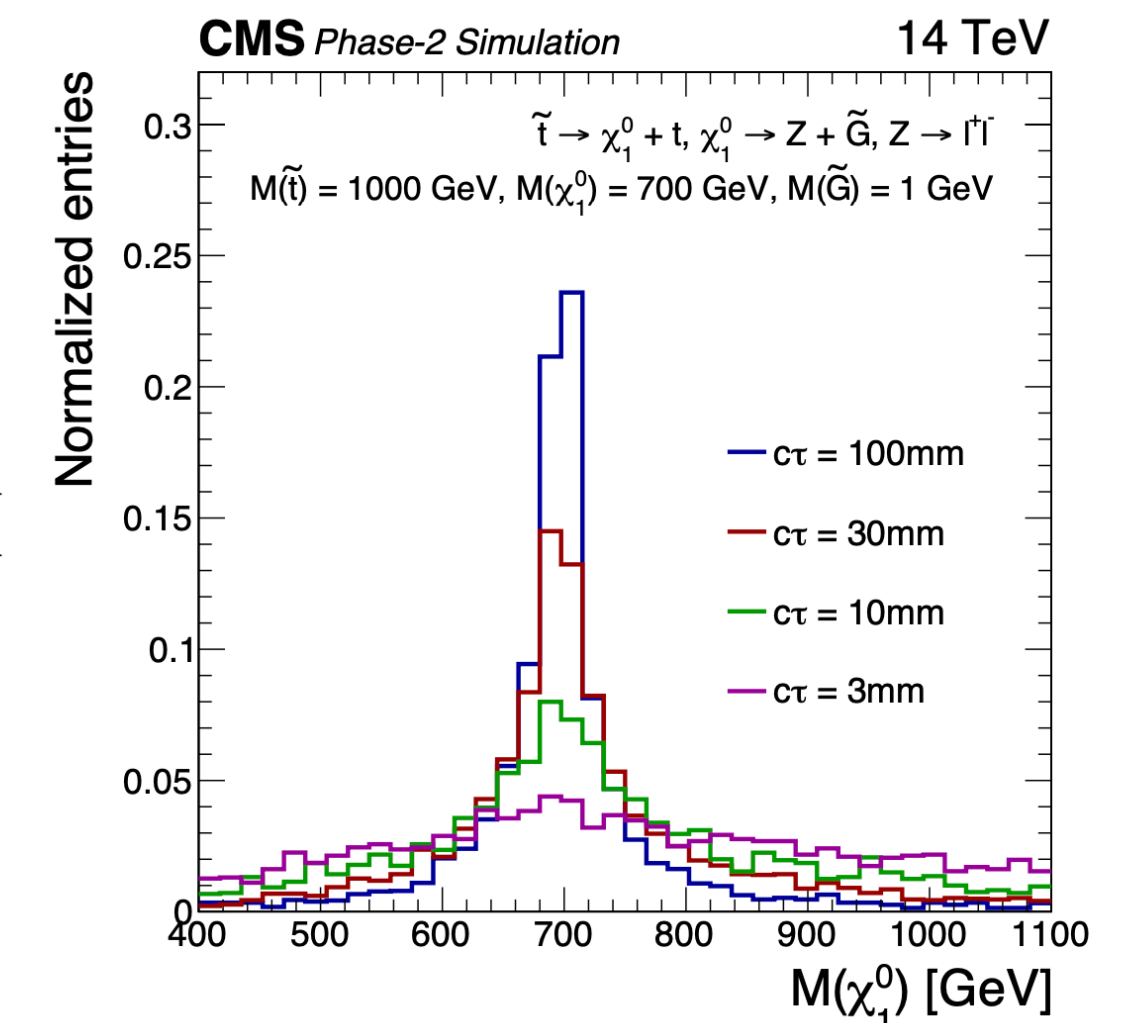


Long-Lived Particles

- Molte **estensioni del Modello Standard** prevedono particelle con lunghe vite medie
- Dal tempo del *displaced vertex* si calcola β_{LLP} e si vincola cinematicamente la massa della LLP misurandone la velocità



Produzione a coppie e decadimento di stop



Ricostruzione dei vertici

Ricostruzione 4D legacy

- Vertice 4D clusterizzato usando **estensione del DA** nella coordinata spaziale z lungo la beam line e nel tempo t estrapolato indietro al punto di massimo avvicinamento (PCA) al centro del *beamspot*
- **Tempo traccia al vertice di collisione** ottenuto associando misura di tempo in MTD e correggendo per tempo di volo (TOF, da lunghezza del percorso e velocità della particella):

$$t_0 = t_{MTD} - TOF(\pi, K, p)$$

- **Velocità** (calcolata a partire dal momento) dipende dall'**ipotesi di massa**, in particolare a bassi momenti
- Prima della ricostruzione del vertice non si ha informazione sul tipo di particella, l'**ipotesi di pione** (più probabile) è usata e l'incertezza su t_0 è inflazionata

$$\sigma_0^2 = \sigma_{MTD}^2 + \sigma_{TOF}^2 + \Delta^2(TOF_p - TOF_\pi)$$

- Ottenuto il tempo del vertice dai tempi delle tracce, è possibile fare **particle ID** tramite la richiesta di compatibilità spazio-temporale tra la traccia propagata indietro al PCA e il vertice a cui la traccia è associata
- **Seconda iterazione** della ricostruzione 4D usando i tempi aggiornati secondo le ipotesi di massa (incertezza inflazionata rimossa per pioni, ricalcolata appropriatamente per kaoni e protoni)

Studio delle prestazioni

Associazione dei vertici alla verità Monte Carlo

- Per valutare le prestazioni della ricostruzione dei vertici, è stato sviluppato un algoritmo di *matching* tra i **vertici ricostruiti** e la **verità MC**, basato sull'origine comune delle tracce nei vertici ricostruiti e in quelli simulati
- Le tracce ricostruite sono abbinate alle particelle cariche simulate, i vertici simulati da cui provengono definiscono l'insieme dei veri vertici primari dell'evento. L'algoritmo di *matching* si basa sulla somma dei pesi:

$$W_{os} = \frac{w_{trk}}{\sigma_{z,trk}^2} \frac{1}{erf(\sigma_t/\sigma_T)}$$

- dove w_{trk} è il peso assegnato dall'*adaptive vertex fit*, $\sigma_{z,trk}$ la risoluzione della traccia, σ_t l'incertezza temporale della traccia e σ_T quella del beamspot (la parte dipendente dal tempo è presente solo per le tracce con informazioni temporali)
- Viene eseguita una **corrispondenza uno-a-uno**: per un dato vertice ricostruito, il vertice simulato che domina è quello con la maggiore somma di W_{os}
- Quando possibile, il vertice simulato che domina viene abbinato a quello ricostruito. Se un vertice simulato domina più di un vertice ricostruito, l'abbinamento avviene tra quel vertice simulato e quello ricostruito che riceve il peso maggiore tra i vertici ricostruiti dominati. L'algoritmo procede in iterativo per tutti i vertici ricostruiti
- In base al risultato dell'algoritmo, i vertici vengono classificati come:
 - Reali: viene trovata una corrispondenza entro il numero massimo di iterazioni consentito (impostato su 8)
 - Falsi: non è possibile trovare una corrispondenza, ovvero non esiste un vertice simulato che domini il vertice ricostruito e che non domini altri vertici